

УДК 658.5

В.Г. Иванов

АНАЛИЗ ВЗАИМНОЙ ЕМКОСТИ И ИНДУКТИВНОСТИ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

У статті проаналізована взаємна ємність і індуктивність друкованого монтажу, запропоновано спосіб оцінки між-проводникових ємностей при трасуванні електричних з'єднань, який орієнтований на багатопланову каналну модель.

В статье проанализирована взаимная емкость и индуктивность печатного монтажа, предложен способ оценки межпроводниковых емкостей при трассировке электрических соединений, который ориентирован на многослойную каналную модель.

С ростом степени интеграции и быстродействия микроэлектронных устройств все большее значение приобретает обеспечение помехоустойчивости топологии. Помехи при работе устройства могут возникать в силу ряда причин, однако наибольшее значение здесь играют паразитные межпроводниковые емкости. Для устройств большой степени интеграции встает задача оценки паразитных емкостей непосредственно в процессе проектирования, которая в настоящее время не решена.

В цифровой электронике взаимная емкость и взаимная индуктивность обычно создают нежелательные перекрестные помехи, с которыми приходится бороться. Собственная емкость и собственная индуктивность могут принести как пользу, так и вред, в зависимости от конкретной схемы.

Между цепями всегда существует взаимная емкостная связь. Электрические поля, создаваемые напряжениями, действующими в одной цепи, воздействуют на другую цепь. Между любыми электрическими цепями существует взаимная связь через электрическое поле, – с увеличением расстояния между цепями коэффициент взаимной связи быстро уменьшается. Коэффициент взаимной электрической связи двух цепей называется их взаимной емкостью и измеряется в фарадах или $(A \times C)/B$. Взаимная емкостная связь двух цепей, А и В, это, по существу, паразитная емкость, включенная между ними.

Взаимная емкость C_M обуславливает появление в цепи В тока I_M , мгновенное значение которого пропорционально скорости изменения напряжения в цепи А, в соответствии со следующей формулой:

$$I_M = C_M \frac{dV_A}{dt}. \quad (1)$$

Данная формула является простой приближенной формулой оценки фактической величины тока помехи, вызванной взаимной связью цепей. Точная формула должна была бы учитывать разницу напряжений в цепях А и В и влияние емкости C_M на режим работы обеих цепей. Данное приближение справедливо при выполнении следующих условий.

1. Ток связи через емкость C_M значительно меньше тока основного сигнала в цепи А. Поэтому емкость C_M не нагружает цепь А.

2. Напряжение помехи, создаваемой за счет емкостной взаимной связи в цепи В, меньше, чем напряжение основного сигнала в цепи А. Тогда при расчете тока помехи можно пренебречь небольшим напряжением, возникающим в цепи В за счет взаимной связи и принять разность напряжений между цепями А и В равной V_A .

3. Реактивное сопротивление конденсатора превышает реактивное сопротивление цепи В по отношению к земле. Напряжение помехи за счет взаимной связи в этом случае будет равно произведению тока I_M

на реактивное сопротивление цепи В по отношению к земле. В этом случае мы не учитываем влияние взаимной емкости на режим работы цепи В [1].

В случае, когда амплитуда напряжения помехи, вызванной взаимной связью цепей, составляет менее 10 % амплитуды полезного импульсного сигнала, погрешность оценки, полученной с помощью этой приближенной формулы, составляет примерно 10 %. Такой точности вполне достаточно для того, чтобы установить, на какие эффекты следует обратить внимание. Если же напряжение помехи, вызванной взаимной связью, превышает 10 % уровня полезного сигнала, то погрешность оценки, обеспечиваемой данным приближением, становится выше, но при 10 %-ом уровне перекрестной помехи цифровая схема, вероятно, окажется неработоспособной и добиваться повышения точности расчета будет просто ни к чему.

Между контурами с током обязательно возникает взаимная индуктивность. Магнитное поле, создаваемое током, протекающим в одном из контуров, воздействует на другой контур. Между проводящими контурами с током существует взаимная связь, быстро ослабевающая с увеличением расстояния между ними. Количественной мерой взаимной связи между проводящими контурами с током является параметр, который называется взаимной индуктивностью. Взаимная индуктивность измеряется в Генри или $(\text{Вольт} \times \text{секунда})/\text{Ампер}$. Взаимная индуктивная связь между цепями действует аналогично крошечному трансформатору, включенному между цепями А и В. Где бы ни оказались по соседству друг с другом два контура с током, они взаимодействуют подобно первичной и вторичной обмоткам трансформатора, и между ними возникает взаимная индуктивность.

Взаимная индуктивность L_M вызывает появление в цепи В помехи, мгновенное напряжение которой Y связано со скоростью изменения силы тока в цепи А следующей формулой:

$$Y = L_M \frac{dI_A}{dt}. \quad (2)$$

Резкие изменения тока в цепи А индуцируют в цепи В большие напряжения, поэтому учет взаимной индуктивной связи имеет важное значение при конструировании высокоскоростных цифровых устройств.

Приведенная формула является первым приближением фактической величины напряжения помехи, вызванной взаимной индуктивностью цепей. Точная формула должна была бы учитывать разницу токов в цепях А и В и влияние собственной индуктивности "первичной" и "вторичной" обмоток на режим работы обеих цепей. Приближение справедливо при выполнении следующих условий:

© В.Г. Иванов

1. Напряжение помехи, наводимое на индуктивности L_M мало по сравнению с напряжением первичного сигнала в цепи А. Таким образом взаимная индуктивность L_M не влияет на режим работы цепи А. Напряжение помехи, возникающей в цифровых схемах за счет взаимной индуктивности, всегда меньше напряжения сигнала, создающего эту помеху.

2. Ток помехи в цепи В меньше тока сигнала в цепи А. Таким образом, током помехи в цепи В можно пренебречь и принять разницу токов в первичной и вторичной цепях равной просто току I_A .

3. Предполагается, что вносимый импеданс, обусловленный взаимной индуктивностью, мал по сравнению с собственным импедансом цепи В по отношению к земле. Это позволяет просто добавить напряжение помехи, вызванной взаимной индуктивной связью цепей, к напряжению полезного сигнала в цепи В. В этом приближении не учитывается влияние, оказываемое взаимной индуктивностью на режим работы цепи В.

В цифровых схемах взаимная индуктивность, как и взаимная емкость, обычно вызывает появление нежелательной перекрестной связи между цепями:

1. Ток, протекающий в проводящем контуре А, возбуждает в пространстве, окружающем проводник, магнитное поле. Чем больше сила тока, тем выше напряженность возбуждаемого им магнитного поля в пространстве, окружающем контур А.

2. Вычислим полный поток силовых линий магнитного поля, создаваемого током, протекающим в контуре А, через площадь, охваченную контуром В. Полный поток силовых линий магнитного поля через площадь, охваченную контуром В, называемый потоком магнитной индукции через контур В, зависит от расстояния между контурами А и В, их физических размеров, взаимной ориентации и прямо пропорционален силе тока, текущего по контуру А. Чем больше сила тока, протекающего в контуре А, тем больше поток магнитной индукции через контур В.

3. Изменение силы тока в контуре А вызывает пропорциональное изменение величины потока магнитной индукции через контур В.

4. Согласно закону электромагнитной индукции величина напряжения, индуцируемого в контуре В, пропорциональна скорости изменения потока магнитной индукции, пронизывающего его.

Объединяя воедино соображения, изложенные в этих четырех пунктах, приходим к выводу о том, что величина напряжения, индуцируемого в проводящем, контуре В, пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре А. Коэффициент пропорциональности называется взаимной индуктивностью цепей А и В.

Поскольку магнитное поле является векторной величиной, то при развороте контура В противоположной стороной к контуру А происходит изменение полярности потока магнитной индукции. В результате происходит также изменение полярности напряжения, индуцируемого в контуре В. Аналогичный разворот контура А, вызовет точно такой же эффект.

Если сориентировать контур В так, чтобы он лежал в плоскости, параллельной силовым линиям магнитного поля, то поток магнитной индукции через контур В станет равен нулю и, соответственно, индуктивная связь между контурами исчезнет.

Помеха, вызванная взаимной индуктивной связью, в отличие от случая взаимной емкостной связи, может иметь полярность, противоположную полярности осуждающего ее сигнала. Кроме того, величина

взаимной индуктивной связи очень сильно зависит от взаимной ориентации контуров [1].

Основное влияние на свои работы больших микросхем (БИС) дает паразитная емкость печатного монтажа [2].

Известен ряд обзорных работ по методам расчета емкостей [3, 4]. Все методы расчета емкостей могут быть разделены на две основные группы (рис. 1): методы непосредственного определения емкостей и методы, основанные на решении системы уравнений Максвелла, требующие, в свою очередь, решения задачи расчета электростатического поля.

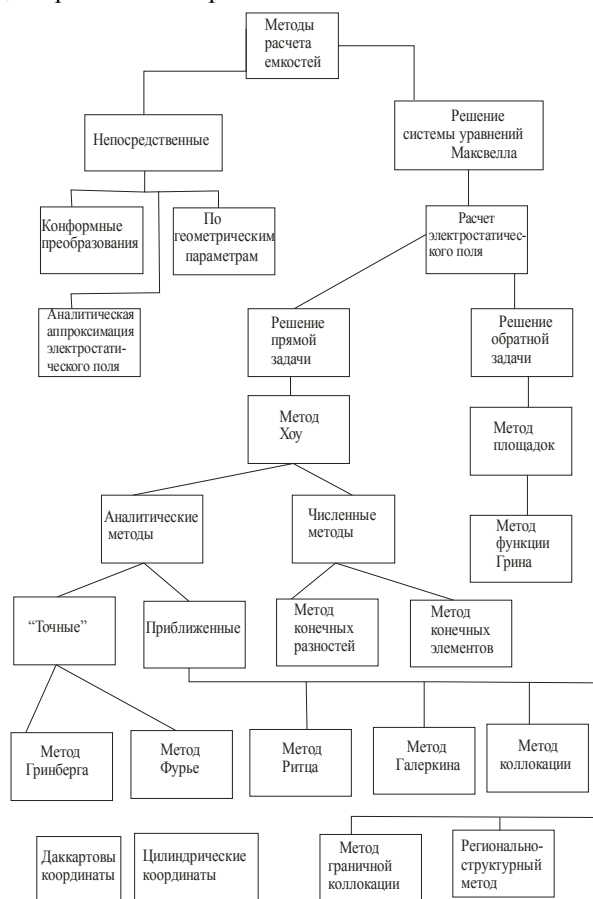


Рис. 1. Классификация методов расчета емкостей

Методы непосредственного определения емкостей не требуют расчета электростатического поля. К этому классу относятся методы конформных преобразований, аналитической аппроксимации электростатического поля, определения емкости по геометрическим параметрам. Метод конформных преобразований основан на свойстве емкости сохранять неизменным свое значение при конформных преобразованиях плоскопараллельных систем.

Суперпозицией конформных преобразований система проводников приводится к виду, для которого известно аналитическое выражение емкости. На геометрию проводников накладываются существенные ограничения, поэтому метод получил ограниченное применение. Метод аналитической аппроксимации электростатического поля позволяет дать двустороннюю оценку значения емкости проводников произвольной формы. Аналитическое приближенное задание эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля проводников позволяет получить неравенства для определения границы интервала, в котором содержится искомое значение емкости.

Наиболее простым путем определения пределов истинного значения емкости является оценка емкости проводников непосредственно по их геометрическим параметрам.

Основными методами здесь являются методы частей симметризации и интегральных геометрических параметров. Емкости проводников в этом случае оцениваются по длине проводника, длине параллельного участка двух проводников, длине "теневого участка".

Непосредственное определение емкости носят, как правило, оценочный характер. Более точно значения емкостей системы проводков могут быть получены решением системы уравнений Максвелла, связывающих заряды на проводниках, потенциалы и потенциальные коэффициенты. Однако при этом требуется произвести расчет электростатического поля - решить соответствующую краевую задачу в частных производных. Решается либо прямая задача определения потенциалов по известному распределению зарядов, либо обратная - распределение зарядов по заданному значению потенциалов. Обратная задача решается методом площадей, использующим, в свою очередь, метод функций Грина.

Прямая задача решается, как правило, в предположении о равномерном распределении зарядов по поверхности каждого проводника методом Хоу. Такое предположение не является адекватным и, поэтому, рассчитанные значения емкостей получаются несколько заниженными. Однако данный вопрос подвергнут дополнительному исследованию, показано, что распределение заряда пленочного проводника существенно отличается от распределения заряда уединенной прямоугольной пластины. Следовательно, предположение о равномерном распределении заряда по длине и ширине проводников микрорелектронных устройств можно считать допустимым.

Распределение потенциала электростатического поля описывается уравнением Лапласа. Соответствующая краевая задача решается либо аналитически, либо численными методами. Аналитические методы можно условно разделить на "точные" и "приближенные". "Точные" методы строят решение задачи в виде суммы бесконечного ряда. Точность получаемого на практике решения определяется количеством реально суммируемых членов ряда и погрешностью вычислений. К данной группе относятся метод Гринберга и наиболее часто применяемый метод Фурье (разделения переменных). Следует отметить, что использование цилиндрических координат при определении потенциала прямоугольных проводников создает дополнительные вычислительные трудности, связанные с расчетом значений координатных функций (функций Бесселя первого ряда нулевого порядка). Использование цилиндрических координат явилось скорее традиционным, так как выражение для значения потенциала получались интегрированием выражения для потенциала точечного заряда. Более предпочтительным представляется использование декартовых координат и соответствующих тригонометрических координатных функций.

В приближенных методах находится наилучшее в смысле некоторой нормы приближение решения краевой задачи линейной комбинацией заданного набора функций. К этой группе относятся методы Ритца, Галеркина, коллокации, граничной коллокации, регионально-структурный метод.

Численные методы находят решение в виде числовых значений функции в некоторых заданных числовых значениях аргумента. Наиболее часто используемые методы - конечных разностей и конечных элементов. В методах конечных разностей область непрерывного изменения аргумента заменяют дискретным множеством узлов. Частные производные заменяются разностными соотношениями, краевая задача сводится к системе разностных алгебраических уравнений (разностной схеме). В методах конечных элементов область аргумента с помощью сетки разбивают на отдельные подобласти - конечные элементы. Решение при этом аппроксимируется дискретной моделью, которую строят на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечных элементах. Общий недостаток численных методов - высокая размерность результирующей системы алгебраических уравнений.

В заключение отметим, если методы непосредственного определения емкостей отличаются невысокой точностью и ограниченной областью применения, то методы, связанные с расчетом электростатического поля характеризуются большой сложностью, высокими временными затратами. Второй класс методов в чистом виде может использоваться только для однократных оценок полностью спроектированной топологии. Многократные оценки проводников в процессе проектирования печатного монтажа возможны лишь на основе некоторой разумной комбинации методов первого и второго классов на основе учета технологических особенностей микрорелектронных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reed J., Sangiovanni-Vincentelli A., Santomauro M. A new symbolic channel router: YACBR2. *IEEE Trans. On Computer-aided design*, 1985, vol. CAD-4, no.1, pp. 25-35.
2. Kleinhans J.M. Efficient algorithms for two- and three-layer channel routing. *Proc. Int. Conf. Comput. Technol. Syst. and Appl.*, 1987, pp. 629-632.
3. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Перевод с англ. - М.: Мир, 1978. - 432 с.
4. Селготин В.А. Автоматизированное проектирование топологии БИС. - М.: Радио и связь, 1983. - 112 с.

REFERENCES: 1. Reed J., Sangiovanni-Vincentelli A., Santomauro M. A new symbolic channel router: YACBR2. *IEEE Trans. On Computer-aided design*, 1985, vol. CAD-4, no.1, pp. 25-35. 2. Kleinhans J.M. Efficient algorithms for two- and three-layer channel routing. *Proc. Int. Conf. Comput. Technol. Syst. and Appl.*, 1987, pp. 629-632. 3. Kristofides N. *Teoriia grafov. Algoritmicheskii podkhod*. *Perevod s angl.* [Graph theory. An algorithmic approach. Translated from English]. Moscow, Mir Publ., 1978. 432 p. 4. Selgotin V.A. *Avtomatizirovannoe proektirovanie topologii BIS* [Computer-aided design topology of BIS]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983. 112 p.

Поступила (received) 19.11.2013

*Иванов Виталий Геннадьевич, к.т.н.,
Институт химических технологий
Восточноукраинского национального университета
им. Владимира Даля,
93009, Луганская обл., Рубежное, ул. Ленина, 31,
тел/phone +38 06453 50156, e-mail: vetgen@e-mail.ua*

*V.G. Ivanov
Chemical Technology Institute of Volodymyr Dahl East Ukrainian
National University
31, Lenin Str., Rubizhne, Lugansk region, 93009, Ukraine
Analysis of mutual capacitance and inductance of printed circuit.*

The article analyzes the mutual capacitance and inductance of printed circuit and introduces an evaluation technique for conductor-to-conductor capacitance under electrical connections tracing, the technique based on a multi-layer channel model.

Key words - mutual capacitance and mutual inductance, multi-channel model.